

DOI:10.11784/tdxbz202507010

侵蚀型海滩滩涂垃圾分布规律和积累模式 ——以海南省昌江县棋子湾为例

邹佳宏^{1,2}, 冯曦^{1,2,3}, 刘根^{1,4}, 戚洪帅^{1,4}, 朱钰^{1,5}, 冯卫兵^{1,2}

(1. 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学), 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098;

3. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350;

4. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005; 5. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206)

摘要: 海洋垃圾污染已成为全球性环境问题, 海滩作为陆海交互的关键地带, 既是垃圾的输入源也是沉积汇。本研究以海南昌江棋子湾这一典型开敞侵蚀型反射海滩为研究对象, 基于 2024 年秋季开展的高密度实地调查数据, 系统量化了潮汐冲刷、风-浪-流动力耦合作用以及人类活动对海滩垃圾丰度的影响, 引入熵权法与海滩滩涂垃圾相对污染概率指标对海滩垃圾的空间分布特征及驱动机制进行了综合评估。研究结果显示, 棋子湾海滩秋季垃圾平均丰度 0.60 件/m², 以塑料类为主(71.9%), 人类海岸活动(56%)和航运/捕鱼(39%)是主要来源。海滩垃圾分布表现出空间异质性: 垂岸方向上垃圾丰度由海向陆递增, 大尺寸垃圾集中于沙丘和后滨, 前滨以碎片化垃圾为主; 沿岸方向分布不均匀性明显, 受沿岸流、风应力及人类活动热点(如海滩入口)的共同影响。本研究构建的影响因子量化方法能够有效反映自然动力作用下海滩垃圾的空间分布特征, 为开敞侵蚀型海滩的精准治理提供科学依据。

关键词: 海滩滞留垃圾; 侵蚀型海滩; 空间分布; 影响因素

中图分类号: P753

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)06-0625-16

Distribution Patterns and Accumulation Mechanisms of Beach Litter on Erosion-Type Beach: A Case Study of Qizi Bay in Changjiang, Hainan

Zou Jiahong^{1,2}, Feng Xi^{1,2,3}, Liu Gen^{1,4}, Qi Hongshuai^{1,4}, Zhu Yu^{1,5}, Feng Weibing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 4. The Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China;

5. Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China)

Abstract: Marine litter pollution has become a global environmental issue. As a critical interface between the land and sea, beaches serve both as input sources and deposition sinks for marine litter. This study focuses on Qizi Bay in Changjiang, Hainan, a typical open erosion-type reflective beach. Based on high-density field survey data collected in autumn 2024, the influences of tidal-wave scouring, wind-wave-current dynamic coupling, and human activities on beach litter abundance were systematically quantified. By employing the entropy weight method and a relative pol-

收稿日期: 2025-07-09; 修回日期: 2025-10-08.

作者简介: 邹佳宏(2002—), 女, 硕士研究生, jiahongzou@hhu.edu.cn.

通信作者: 冯卫兵, wbfeng@hhu.edu.cn.

基金项目: 海岸灾害及防护教育部重点实验室(河海大学)开放课题资助项目(J202401); 国家自然科学基金资助项目(52471282); 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室开放课题资助项目(HESS-2403); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放课题资助项目(23-HNHYZZZYHJKFO37).

Supported by the Open Project of the Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University (No. J202401), the National Natural Science Foundation of China (No. 52471282), the Open Project of the State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University (No. HESS-2403), the Open Project of Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment (No. 23-HNHYZZZYHJKFO37).

lution probability index for beach litter, the spatial distribution characteristics and driving mechanisms of beach litter were comprehensively assessed. Results indicate that the average litter abundance at Qizi Bay beach was 0.60 items/m² in autumn, primarily plastic litter (71.9%). The main litter sources were human coastal activities (56%) and shipping and fishing (39%). Furthermore, the beach litter exhibited spatial heterogeneity: in the cross-shore direction, litter abundance increased from sea toward land, with large litter concentrated in the dune and backshore zones, while the foreshore was mainly covered by fragmented litter. Meanwhile, in the alongshore direction, a considerably uneven distribution was observed, influenced by longshore currents, wind stress, and human activity hotspots such as beach entrances. This study's impact factor quantification method effectively reflects the spatial distribution characteristics of beach litter under natural forcing, providing a scientific basis for precisely managing open erosion-type beaches.

Keywords: beached marine litter; erosion-type beach; spatial distribution; influencing factor

受陆源排放和外海输入的共同作用, 海滩成为垃圾的重要中转汇集场所^[1-2]. 海滩垃圾不仅会破坏沿海景观、影响海滩旅游业的发展^[3], 而且碎片化的有毒物质(特别是微塑料)会通过食物链对生态环境和人类健康造成危害^[4-6].

目前大部分海滩垃圾调研以国家、省市级海岸线为单位, 采样点较为分散, 研究空间尺度普遍较大. 然而, 在 1~10 km 尺度的海滩内, 受近岸海滩地形^[7-8]和复杂动力条件^[9-10]影响, 海滩垃圾的迁移与积累模式往往表现出高度的空间异质性. 现有研究证实, 不同尺寸的海滩垃圾在各地砂质海滩上的积累模式和分布规律存在明显差异^[10-13]. 例如, 针对海滩微中尺度塑料垃圾的研究发现, 海滩垃圾的尺寸和数量在靠近海岸处逐渐增加, 而微塑料更倾向于向外海转移^[14-15]. 与广域尺度的研究结果不同, 部分局地研究结果显示, 海滩沉积物中微塑料分布与较大尺寸塑料物品可能无明显关联^[13,16-17], 海滩垃圾丰度与人类活动强度(暴露梯度)无显著相关性^[11,18-19]. 这些现象表明, 海滩微地貌特征(如坡度、曲率)和动力环境的变化可能会在小尺度范围内显著影响海滩垃圾的分布, 这类影响作用尚未得到充分、严格的分析, 严重制约了局地海滩垃圾治理的有效性和针对性. 现有的大范围调查对探究海滩垃圾小尺度分布特征的指导意义有限, 亟需开展高精度现场调查研究以揭示小尺度范围内海滩垃圾空间分布的驱动因素.

本研究选取中国海南省昌江黎族自治县西部、北部湾东南部的棋子湾海滩作为研究区域, 其经度范围为 108.700 8°E~108.710 6°E, 纬度范围为 19.371 6°N~19.372 1°N. 该区域作为海南西部重要的滨海旅游节点, 近年来随着“蓝色海湾”海洋生态修复项目及“美丽中国”国家发展战略的深入推进, 区域性海滩生态保护与环境监测工作得到显著加强^[20-23]. 棋子湾海滩自然条件复杂, 潮流作用强, 属于潮沟发育型

海滩, 海岸线以侵蚀为主^[24]. 同时, 波浪作用下海滩剖面地形的不稳定性与强烈的离岸流环境形成了复杂的物质运输模式, 是探究微地貌特征与海滩垃圾空间分布关系的理想场所. 人为活动方面, 棋子湾毗邻渔业和水产养殖基地(沙渔塘港)^[25], 作为环岛旅游度假区, 旅游业与渔业的双重影响^[26]使其成为研究陆海交互作用下垃圾空间分布模式的理想区域. 然而, 棋子湾海滩环境监测数据匮乏, 难以支撑对区域环境变化趋势的深入分析. 因此, 亟需针对棋子湾开展系统的实地调研与理论研究.

本研究通过高密度实地调研, 统计分析了海滩垃圾的丰度、尺寸、种类、来源等特征, 同时, 构建了潮波侵蚀作用、风浪流综合动力作用及人类活动作用对海滩垃圾空间分布影响的量化框架, 并引入海滩滩涂垃圾相对污染概率指标来表征海滩垃圾的区域性积累强度, 为侵蚀型海滩污染预警与针对性分区治理提供方法学参考.

1 研究方法

1.1 研究区域

采样海滩位于棋子湾中心区域, 采样区域沿岸方向平直(图 1(a)), 东西长约 1 km. 该海滩为风暴露程度较高、水动力环境较强的开敞砂质海滩, 沙滩剖面呈现出明显的动态变化特征. 海岸风沙与海滩沙的粒度组成主要为中砂, 沉积物以跃移质为主^[27]. 大潮高潮位线附近的堆积区较为明显, 可通过干海藻、贝类碎屑以及木棍树枝等的存在来识别.

采样区域两侧分别有开发的酒店及住宅区, 主体为自然风光带, 东西两端各设一处沙滩入口, 入口 1 位于采样区域内, 与某酒店相接, 只能步行进入, 入口 2 位于采样区域外东侧约 290 m 处, 与公路连通, 可以供车辆行驶进入.

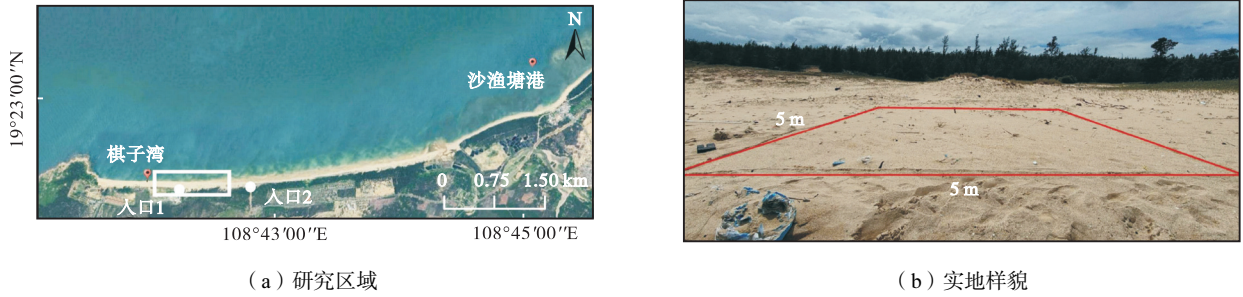


图1 研究区域和实地样貌
Fig.1 Location and field actual picture of the study area

1.2 采样方法

现场采样工作于2024年秋季9月中旬开展。采样期间盛行风向为东风和东北风，风力3~4级，浪高0.3~0.6m，最大潮差为2.2m，采样选取在每天低潮时段进行。考虑到采样带的代表性与可及性，在研究区域内以入口1为基准，沿海岸线东西方向每隔约150m设置一条南北走向的长100m、宽10m的采样带(图2)，共设置7条(A~G)。之后将采样带根据地形划分为沙丘区(1区)、后滨区(2区)与前滨区(3区)，采用GPS定位采样带的中轴线，围绕中轴线在沙丘、后滨、前滨区域随机选取5m×5m的采样区域，参见文献[28-31]，采用卷尺测量边长、用RTK定位并用木桩定位角点。

采样时对滩面进行目视检查并将深度10cm以内的表层沙翻起，统计浅表层范围内所有可见垃圾的种类、尺寸及数量，并拍照记录。后滨和前滨区域垃

圾尺寸普遍较小，团队先将5m×5m的采样区域进一步划分为25个1m×1m的内部网格，通过统计各网格内垃圾数量并取平均值，推算该区域的最终丰度。沙丘区域以大型垃圾为主，故在每个采样带中轴线附近随机选取两处5m×5m的样方，由两组人员同步采样。两组统计结果差异均小于10%，最终取平均值作为该沙丘区域的垃圾数量。采集到的垃圾均被清理出研究区域，以保证结果的独立性和准确性。

采样完成后使用手持RTK对采样带断面地形进行测量，测量范围从水陆交界处延伸至沙丘植被覆盖带前缘，结合Google Earth Pro遥感数据测算各采样带断面坡度及其与入口的水平直线距离(表1)。实验期间通过浪-流同步声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)和风速仪对研究区域的水动力和风场参数进行实时监测(图2)，并通过潮汐表精灵APP进行实报潮位的记录。

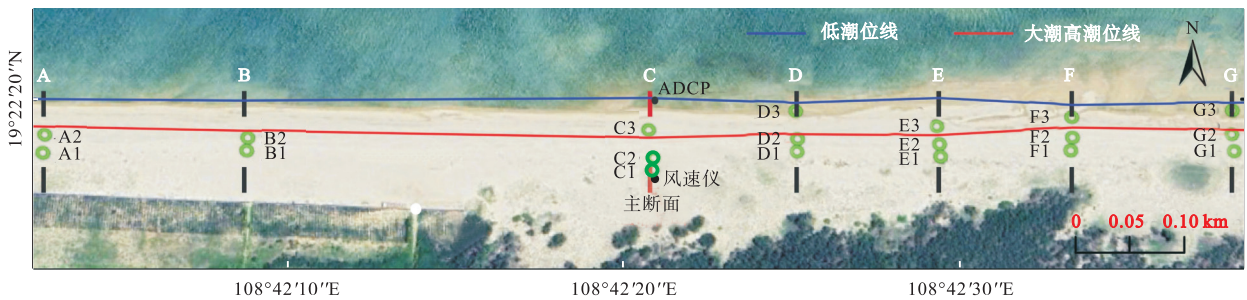


图2 采样布设方案
Fig.2 Sampling layout scheme

需要说明的是，本研究重点关注近岸风、浪、流等短周期、高频变化的动力过程对海滩垃圾分布的短期影响，其驱动机制与雨季降水或旅游活动强度等长期季节性因素存在本质区别。因此，本文的采样设计与分析框架重点聚焦于短时间尺度内海滩垃圾的积累分布特征及其影响因素，而非中长期(季节性、年代际)变化。

采用Wright等^[7]提出的无量纲泥沙参数Ω进行采样断面类型判断，计算结果显示(表1)，采样带

A~G的Ω值均小于1，棋子湾海滩调查区域整体属于反射型海滩。具体计算式为

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T_s} \tag{1}$$

$$\omega_s = \frac{RgD^2}{C_1\nu + (0.75C_2RgD^3)^{0.5}} \tag{2}$$

式中： H_b 为破碎波高，m； ω_s 为沉降速度，m/s，采用Ferguson等^[32]提出的公式计算； R 为沉积物水下比重，取1.65； D 为泥沙中值粒径； C_1 、 C_2 为常数，取

表 1 采样带与采样区域信息
Tab.1 Information of sampling belts and areas

采样带	采样区域	高程/m	纬度	经度	断面坡度	破碎波高/m	泥沙参数 Ω	距入口 1 水平直线 距离/m	距入口 2 水平直线 距离/m
A	A1	4.162	19.371 8°N	108.700 8°E	0.057 0	0.373 6	0.820 5	325.71	1 331.59
	A2	2.837	19.371 9°N	108.700 8°E					
B	B1	3.977	19.371 8°N	108.702 4°E	0.058 1	0.374 6	0.822 8	149.40	1 155.28
	B2	2.792	19.371 9°N	108.702 5°E					
	C1	5.170	19.371 6°N	108.705 8°E					
C	C2	4.238	19.371 7°N	108.705 8°E	0.052 9	0.369 6	0.811 7	198.51	807.37
	C3	2.585	19.372 0°N	108.705 7°E					
	D1	4.140	19.371 8°N	108.706 9°E					
D	D2	2.692	19.371 9°N	108.707 0°E	0.053 5	0.370 2	0.813 0	323.78	682.10
	D3	0.830	19.372 1°N	108.707 0°E					
	E1	4.440	19.371 7°N	108.708 1°E					
E	E2	3.149	19.371 8°N	108.708 1°E	0.057 7	0.374 3	0.821 9	445.63	560.25
	E3	0.948	19.372 0°N	108.708 1°E					
	F1	3.806	19.371 8°N	108.709 2°E					
F	F2	2.688	19.371 9°N	108.709 2°E	0.078 2	0.390 9	0.858 4	560.04	445.84
	F3	1.268	19.372 1°N	108.709 2°E					
	G1	3.819	19.371 8°N	108.710 5°E					
G	G2	1.971	19.371 9°N	108.710 5°E	0.046 0	0.362 4	0.795 8	699.53	306.35
	G3	0.819	19.372 1°N	108.710 6°E					

注：采样区域高程基准面为 1985 国家高程基准。

$C_1 = 18, C_2 = 1^{[32]}$; ν 为运动黏滞系数, $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ ($\text{kg} \cdot \text{m})/\text{s}$; T_s 为波周期, s. 当 $\Omega < 1$ 时, 海滩为反射型; 当 $1 \leq \Omega \leq 6$ 时, 海滩为中间型; 当 $\Omega > 6$ 时, 海滩为耗散型。

破碎波高 H_b 依据 le Méhauté 等^[33]给出的经验公式, 结合实测波浪数据进行计算:

$$\frac{H_b}{H'_0} = 0.76 \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{-1/4} \tan^{1/7} \beta \quad (3)$$

式中: H'_0 为考虑折射绕射作用后的等价深水波高; $\tan \beta$ 为断面坡度; L_0 为深水波长。

1.3 数据处理方法

1.3.1 垃圾丰度计算

采用丰度来量化采样区域中的垃圾含量, 某种垃圾 i 的丰度 D_i 计算式为

$$D_i = \frac{n_i}{A} \quad (4)$$

式中: n_i 为采样区域内垃圾 i 的数量; A 为采样区域面积, m^2 . 值得注意的是, 本次调研的海滩垃圾特指人为产生的废弃物, 木制品仅统计具有明显人工加工痕迹的部分, 树枝等植被凋落物单独进行分析, 并未包含在本文海滩垃圾统计范围内。

为评估海滩清洁度, 引入清洁海岸指数 (clean-coast index, CCI)^[34], 其计算式为

$$\text{CCI} = \frac{\sum n_i}{A} \times 20 \quad (5)$$

$\text{CCI} < 2$ 表示海滩非常清洁, $2 \leq \text{CCI} < 5$ 表示清洁, $5 \leq \text{CCI} < 10$ 表示中度清洁, $10 \leq \text{CCI} < 20$ 表示轻度污染, $\text{CCI} \geq 20$ 表示污染。

同时采用塑料丰度指数 (plastic abundance index, PAI)^[35]来表征海滩的塑料污染程度, 其计算式为

$$\text{PAI} = \frac{\sum m_j}{\lg \sum n_i} \times 20 \quad (6)$$

式中 m_j 为采样区域内塑料垃圾 j 的数量. $\text{PAI} < 0.1$ 表示海滩为非常轻度/无塑料污染, $0.1 \leq \text{PAI} < 1$ 表示轻度塑料污染, $1 \leq \text{PAI} < 4$ 表示中度塑料污染, $4 \leq \text{PAI} < 8$ 表示较高度塑料污染, $\text{PAI} \geq 8$ 表示高度塑料污染。

1.3.2 垃圾尺寸及材料分类

参照《海洋垃圾监测与评价技术规程(试行)》^[36]的分类标准, 将海滩垃圾按尺寸分为小块垃圾(尺寸 $< 2.5 \text{ cm}$)、中块垃圾 ($2.5 \text{ cm} \leq \text{尺寸} \leq 10 \text{ cm}$)、大块垃圾 ($10 \text{ cm} < \text{尺寸} \leq 1 \text{ m}$) 和特大块垃圾 (尺寸 $> 1 \text{ m}$)。按材料类型分为塑料类、聚苯乙烯泡沫塑料类、玻璃类、金属类、橡胶类、织物(布)类、木制品类、纸类和其他共 9 类。

1.3.3 垃圾来源统计

采用联合国环境署西北太平洋行动计划 (NOWPAP) 的分类方法对海滩垃圾来源进行识别与统计^[37], 划分为人类海岸活动、吸烟用品、航运/捕鱼

活动、医疗/卫生用品和其他弃置物 5 类, 该分类体系已广泛应用于中国沿海地区的海滩垃圾监测研究中^[20-22, 38].

2 结果分析

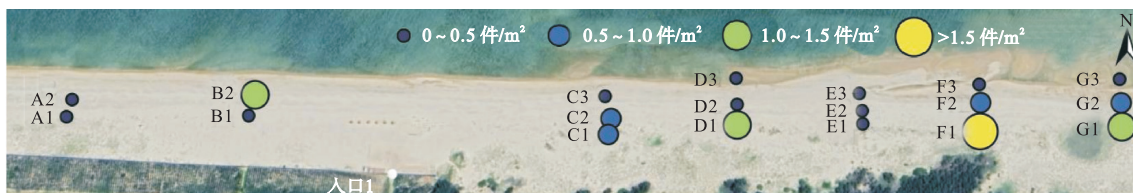
2.1 垃圾丰度

所有采样区域内共采集到垃圾 285 件, 整体平均丰度为 0.60 件/m². 空间分布显示, 沙丘区(1 区)垃圾丰度显著较高, 在 F1 区域达到峰值(2.44 件/m²), 这可能与海滩清洁的临时垃圾堆放点有关; 邻近游客出入口的 G1(1.16 件/m²)和 C1(0.68 件/m²)区域垃圾丰度也明显偏高, 表明游客活动对垃圾分布的潜在影响. 整体上海滩垃圾主要分布在沙丘区和后滨区

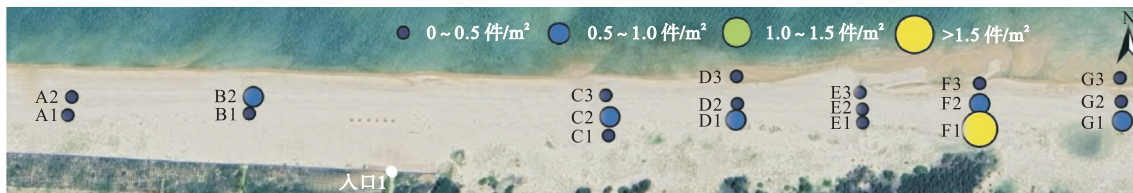
(1、2 区), 前滨区(3 区)处垃圾丰度普遍低于 0.50 件/m², 且以 F1 为中心垃圾丰度呈现向两侧及向海递减的趋势(图 3(a)). 塑料垃圾的分布特征与总体垃圾分布高度一致(Spearman 相关系数 $r_s = 0.976, p < 0.001$).

2.2 垃圾尺寸

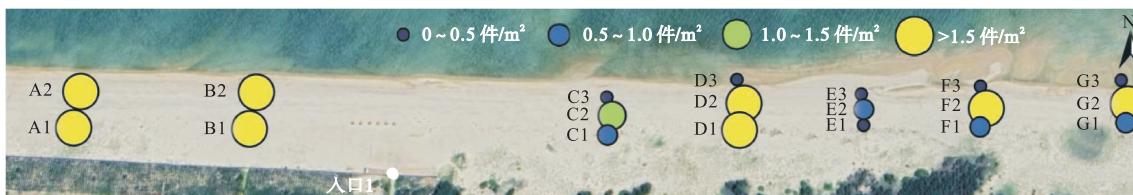
基于现场测量与影像分析, 统计结果显示中块垃圾(51.2%)和大块垃圾(44.2%)为主要尺寸组分, 小块和特大块垃圾占比较少. 各采样区域的垃圾尺寸分布特征与海滩整体分布趋势一致, 均以中块和大块垃圾为主. 值得注意的是, 图 4 中位于相近高程的采样区域具有更相似的垃圾尺寸分布组成, 表明高程可能是影响垃圾尺寸分布的重要环境因子.



(a) 垃圾总丰度



(b) 塑料垃圾丰度



(c) 天然木材丰度

图 3 海滩垃圾丰度的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of beach litter abundance

2.3 垃圾颜色

对全部 285 件海滩垃圾的颜色特征进行统计发现, 白色/透明垃圾占比最高(34.74%), 主要为塑料制品. 部分黄色与棕色垃圾可能源于塑料在紫外线等多种因素作用下发生的老化^[39-40]. 其他常见颜色包括绿色(16.14%)、黑色(10.88%)和蓝色(10.53%), 多为渔业活动垃圾(如尼龙绳、渔浮等). 空间分布

显示, 垃圾颜色组成在各采样区域间无显著差异(图 5(b)).

2.4 垃圾种类

本研究共识别出 25 种具体物品, 包括塑料瓶、渔网、打火机等. 值得注意的是, 28% 的海滩垃圾为塑料、泡沫、玻璃、木制品等材料的碎片, 现场观测表明这些碎片主要源于大型垃圾的破碎或降解.

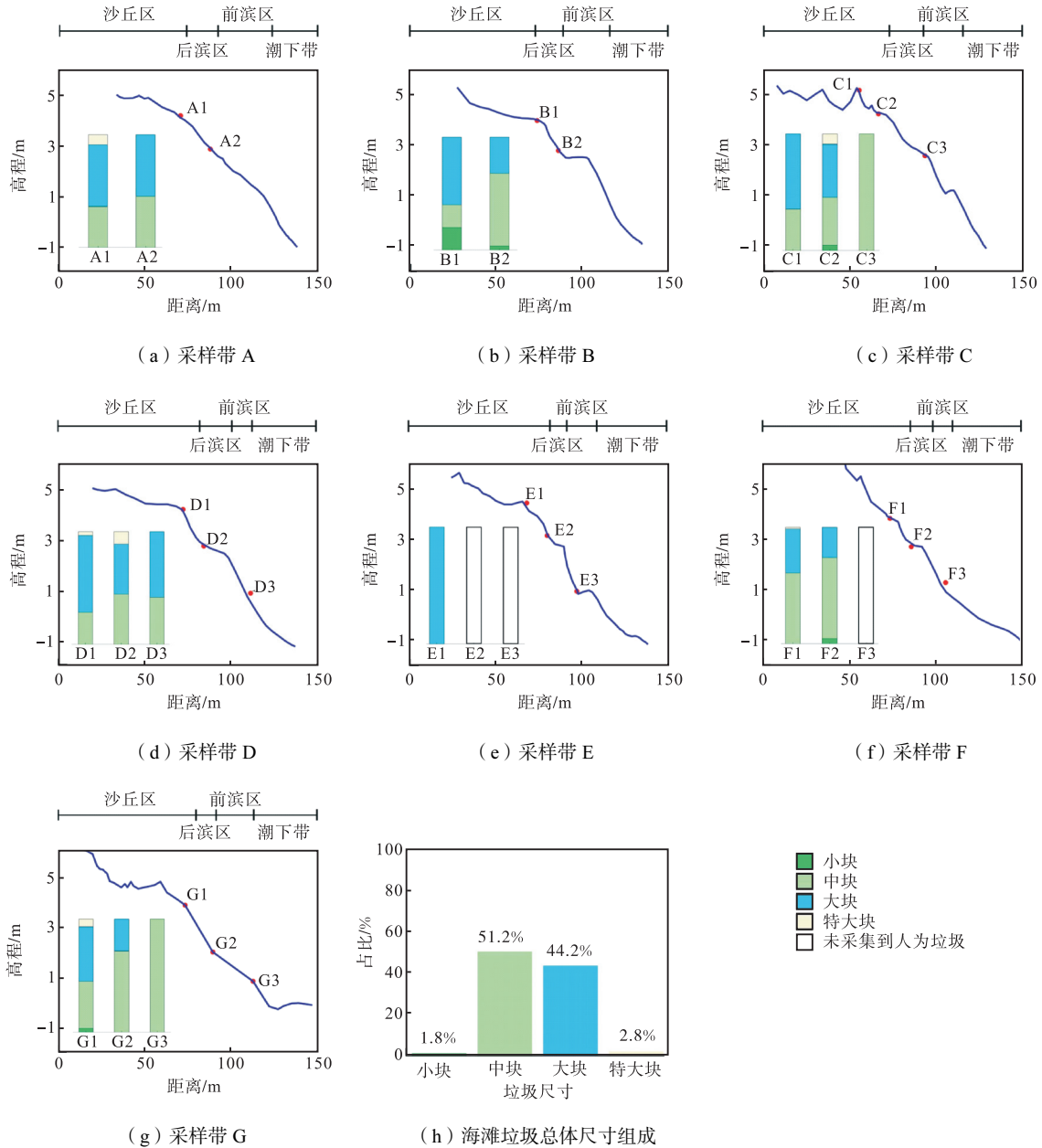


图 4 各采样带地形及垃圾尺寸组成与总体尺寸分布

Fig.4 Topography and litter size composition of each transect belt and overall size distribution

按材料类型划分,塑料类垃圾占总数的 71.9%,识别出的 25 种物品中有 19 种属于塑料类,表明塑料在海滩上普遍存在. 其次为木制品类(11.2%)和聚苯乙烯泡沫塑料类(6.0%)垃圾,具体分布特征见图 6. 海滩塑料类垃圾以碎片(23.7%)为主,反映了塑料在海滩上的高破碎降解率,其次为渔业活动使用的尼龙绳(21.33%)、塑料渔浮(18.96%),以及塑料瓶盖(11.35%)、塑料包装袋(6.16%)等旅游废弃物. 采样区域内聚苯乙烯泡沫塑料类垃圾主要为水产泡沫箱碎片,相关研究已证实聚苯乙烯泡沫塑料大量分布于水产养殖活动较多的地区^[41-42].

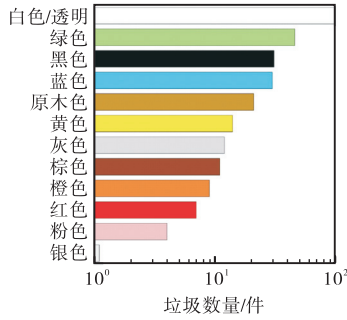
2.5 垃圾来源

棋子湾海滩垃圾的来源构成与当地旅游业、渔业及水产养殖业关联紧密. 为厘清其主要源-汇路径,研究团队通过连续采样、现场观测及实地走访等多元手段,开展了较为系统的溯源研判工作.

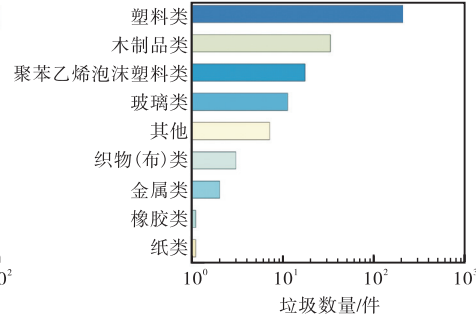
结合为期半个月的连续现场监测结果,发现棋子湾海滩垃圾主要来源于海湾及周边的捕鱼作业与沿岸旅游活动. 该溯源结论及分类方式同时符合 NOWPAP 海滩垃圾分类标准. 依据此标准对采集数据进一步分类量化后显示(图 7),棋子湾海滩垃圾的来源占比呈现显著特征:人类海岸活动贡献占比最高,达 56%;其次为航运/捕鱼活动,占比 39%.



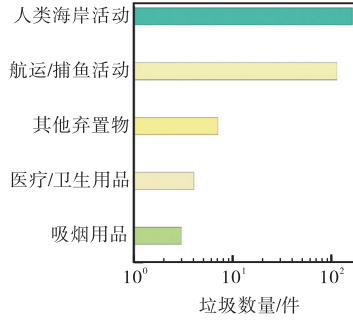
(a) 海滩垃圾颜色分布



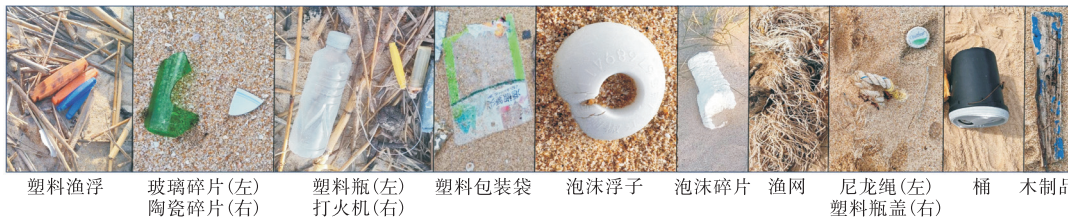
(b) 海滩垃圾颜色组成



(c) 海滩垃圾种类组成



(d) 海滩垃圾来源组成



(e) 试验区域内采集到的部分海滩垃圾

图5 海滩垃圾属性统计分析与实物样本

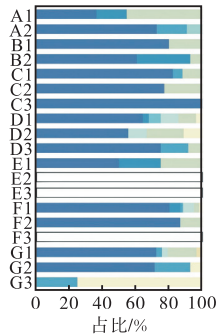
Fig.5 Statistical analysis of beach litter attributes and physical samples



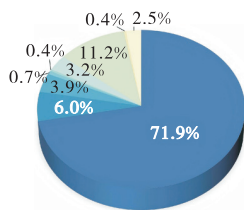
(a) 基于采样位置的垃圾类型组成空间分布



(a) 基于采样位置的垃圾来源组成空间分布



(b) 各采样区域垃圾类型组成



(c) 海滩整体垃圾类型组成

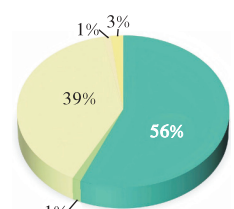
■ 塑料类 ■ 玻璃类 ■ 橡胶类 ■ 木制品类 ■ 其他
 ■ 聚苯乙烯 ■ 金属类 ■ 织物(布)类 ■ 纸类 ■ 未采集到人为垃圾

图6 各采样区域及海滩整体垃圾类型组成

Fig.6 Composition of litter types in each sampling area and on the beach



(b) 各采样区域垃圾来源组成



(c) 海滩整体垃圾来源组成

■ 人类海岸活动 ■ 航运/捕鱼活动 ■ 其他弃置物
 ■ 吸烟用品 ■ 医疗/卫生用品 ■ 未采集到人为垃圾

图7 各采样区域及海滩整体垃圾来源组成

Fig.7 Litter source composition in each sampling area and on the beach

3 讨论

3.1 海滩垃圾与海滩沉积物相关性

关于沉积物粒径对海滩垃圾丰度的影响,已有研究多集中于微塑料^[43-45],针对宏观海滩垃圾的探讨相对有限.基于此,本研究在棋子湾海滩调研期间采集了 6 个采样区域(C3、D3、E3、F2、F3、G3)的沉积物样品.通过筛分法测定其粒度特征,采用平均粒径 D_m 反映沉积物粗细特征,不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 表征级配特征(表 2).

表 2 部分采样区域沉积物粒度特征

Tab.2 Sediment grain size characteristics in partial sampling areas

采样区域	平均粒径 D_m/mm	不均匀系数 C_u/mm	曲率系数 C_c/mm
C3	1.03	2.07	0.92
D3	1.69	1.93	1.00
E3	3.50	2.14	0.96
F2	1.89	5.28	2.02
F3	3.43	2.46	1.11
G3	2.06	4.03	1.55

相关性分析结果表明,沉积物级配与垃圾丰度之间的相关性较弱,均未达到统计显著水平($p > 0.05$).其中, $C_u: r_s = 0.058, p = 0.913$; $C_c: r_s = 0.319, p = 0.538$.相比之下,沉积物平均粒径与海滩垃圾丰度存在一定的负相关关系,虽不显著($D_m: r_s = -0.754, p = 0.084$),但与前人研究得到的结论相符,即细颗粒沉

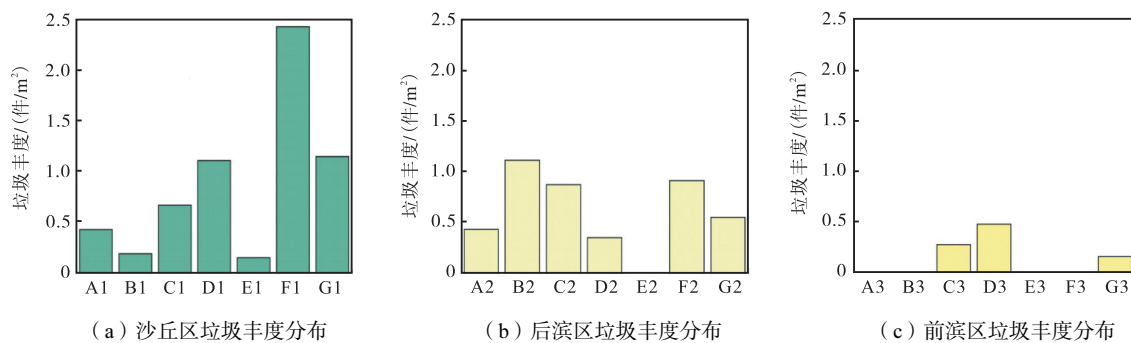
积物可能因孔隙率较小、与垃圾接触面积较大且轻质垃圾更易下陷掩埋等因素而导致较高的垃圾积累率^[46].此外,Hines 等^[47]的研究表明,较粗颗粒沉积物,细颗粒沉积物有利于微塑料积累,并会增强宏观塑料垃圾的滞留,这与棋子湾的观测结果相一致.

3.2 空间分布规律

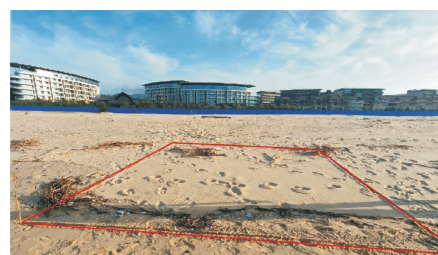
3.2.1 离岸分布规律

海滩垃圾丰度的空间分布特征显示,后滨区与沙丘区处垃圾丰度显著高于前滨区(图 8(a) ~ (c)).从尺寸分布来看,沙丘区以大尺寸垃圾为主(如塑料瓶、玻璃瓶等),而后滨区则以小尺寸垃圾碎片为主,整体呈现出由沙丘区到前滨区垃圾尺寸逐渐减小的趋势.

前滨区处的小型塑料碎片垃圾,可能源于外海直接输入或大尺寸垃圾在近岸波浪作用下的机械磨损与紫外线照射下的老化破碎^[48].分析海滩垃圾动力分选机制发现,由于前滨区域会被海水周期性淹没,中小型碎片垃圾易受波浪爬高、回流等水动力作用影响而迁移,导致其滞留率低,整体垃圾丰度较小.与此同时,调研期间观测到,木制品等不易受风力驱动的垃圾与大部分植被凋落物(如树枝、海带)上岸后多停留于大潮高潮位线附近(图 8(e)),与已有研究中大潮高潮位线作为垃圾汇聚带的观点相一致^[49-50].而大型轻质垃圾(如桶状、瓶状塑料制品)会在向岸风的驱动下向陆输移,部分停留在高潮位线处的垃圾汇聚带,部分继续向岸移动直至沙丘区后侧的植被带,成为后滨区和沙丘区海滩垃圾的重要来源.



(d) 棋子湾海滩大潮高潮位线



(e) 采样区域 B2 内大潮高潮位线垃圾条带

图 8 海滩垃圾丰度分区分布及大潮高潮位线处分布特征

Fig.8 Distribution of beach litter abundance by zone and its characteristics at the high-tide line

3.2.2 沿岸分布规律

以主断面采样带 C 为界, 调查区域呈现出东高西低的垃圾丰度分布格局, 该空间分布主要受人类活动和海洋动力因素的耦合影响. 西侧邻近酒店管理区域(入口 1)的定期清洁减少了垃圾滞留量, 而东侧入口 2 与公路相连, 是海滩的主要入口, 人类活动强

度更高.

采样期间盛行风为东风和东北风(图 9(a)), 会促进东北侧沙渔塘港处的渔业垃圾向采样区输移. 同时近岸处西北方向的潮流(图 9(c))驱动前滨区轻质垃圾向外海迁移扩散, 影响垃圾在前滨区的长期滞留.

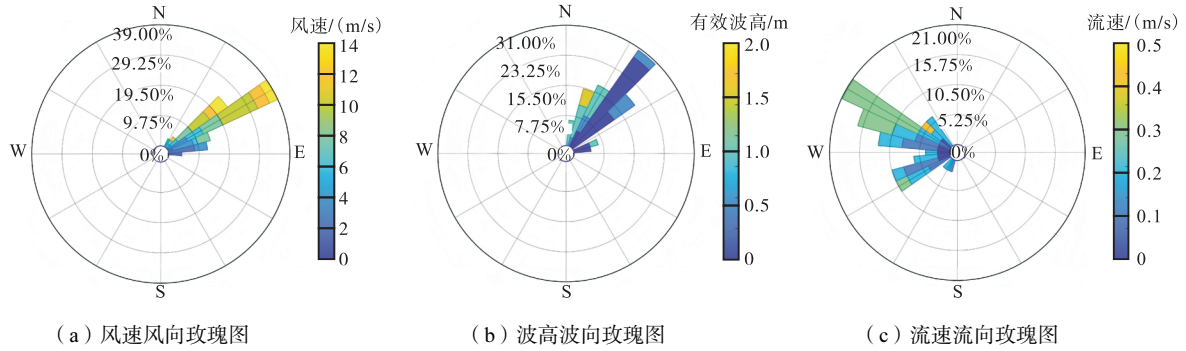


图 9 采样期间同步观测的风、浪、流玫瑰图

Fig.9 Synchronously observed rose diagrams of wind, waves, and currents during the sampling period

3.3 海滩滩涂垃圾污染概率及其影响因素分析

3.3.1 潮波冲刷影响

潮汐涨落与波浪共同作用是影响海滩垃圾能否滞留的重要动力过程. 为定量评估潮波作用对采样区域内海滩垃圾滞留的影响, 基于采样前后 72 h 内时间分辨率为 10 min 的潮高观测序列值(图 10), 结合采样区域高程(详见表 1)计算淹没概率 P_v :

$$P_v = \frac{n_c}{N} \quad (7)$$

式中: n_c 为潮高超过采样高程的次数; N 为采样前后 72 h 内总潮高观测次数, 这里 $N = 856$.

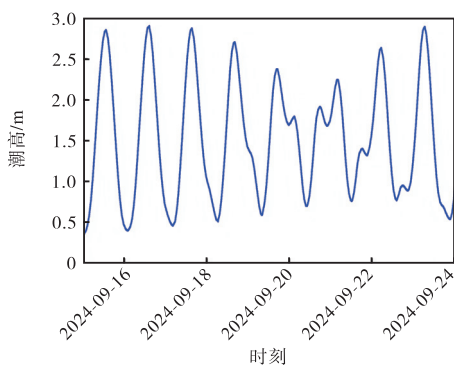


图 10 采样期间潮位时间序列

Fig.10 Time series of tidal height during the sampling period

同时, 为了考虑波浪爬高对垃圾滞留的影响, 采用 Stockdon 等^[51]给出的经验公式计算波浪爬高, 并通过 Sigmoid 函数将其标准化映射至 (0, 1) 区间, 作为对淹没概率的修正系数, 最终计算潮波冲刷影响下的海滩相对污染概率 P'_v :

当 $\xi_0 < 0.3$ 时,

$$R_{2\%} = 0.043(H_0 L_0)^{0.5} \quad (8)$$

当 $0.3 \leq \xi_0 < 3.5$ 时,

$$R_{2\%} = 1.1 \left[0.35(H_0 L_0)^{0.5} \tan \beta + \frac{H_0 L_0 (0.563 \tan^2 \beta + 0.004)^{0.5}}{2} \right] \quad (9)$$

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (10)$$

$$P'_v = 1 - P_v \frac{1}{1 + e^{-5R_{2\%}}} \quad (11)$$

式中: $\tan \beta$ 为断面坡度; H_0 为深水有效波高; L_0 为深水波长; $R_{2\%}$ 为波浪爬高; ξ_0 为 Iribarren 数. 淹没概率越大时冲刷作用越强, P'_v 值越小.

3.3.2 近岸风、浪、流影响

近岸风、浪、流作用机制复杂, 相比于有解析解的潮波模型, 风浪流的非线性作用强且会在近岸地形、岸线作用下发生系列演变. 因此, 本节采用多参数耦合方法将近岸风浪流作为复合要素考量, 将其对海滩垃圾的共同影响简化为: 向岸动力增强滞留效应, 离岸动力增强冲刷效应.

基于矢量投影原理计算风向、浪向、流向与海滩法向之间的有效夹角 θ_{ij} ($\theta_{ij} \in [0^\circ, 180^\circ]$), $\theta_{ij} = 0^\circ$ 表示完全向岸(方向一致), $\theta_{ij} = 180^\circ$ 表示完全离岸(方向相反).

$$\theta_{ij} = \min(|\alpha_i - \alpha_j|, 360^\circ - |\alpha_i - \alpha_j|) \quad (12)$$

式中: $i, j = \{u, h, v, b\}$, 分别指代风(u)、浪(h)、流(v)及海滩法向(b); θ_{ij} 代表 i, j 两项间的有效夹角, 例如, θ_{ub} 代表风向与海滩法向间的有效夹角, θ_{uv} 为风

向和流向间的有效夹角。

为量化各动力因子的强度,对平均风速、平均波高和平均流速进行最大值归一化处理,得到相应的强度系数:

$$u' = u / u_{\max} \quad (13)$$

$$H' = H / H_{\max} \quad (14)$$

$$v' = v / v_{\max} \quad (15)$$

式中: u 、 H 、 v 为平均风速、平均波高和平均流速; u' 、 H' 、 v' 为归一化后的强度系数。

为有效表征风、浪、流三者方向差引起的抵消效应,引入平均余弦夹角值构建惩罚项 Γ :

$$\Gamma = \frac{1}{3} [\cos\theta_{uv} + \cos\theta_{uh} + \cos\theta_{vh}] \quad (16)$$

$$P_h = \Gamma \left(\frac{au' \cos\theta_{ub} + bH' \cos\theta_{hb} + cv' \cos\theta_{vb}}{au' + bH' + cv'} \right) \quad (17)$$

式中: $\Gamma \in [-1, 1]$, $\Gamma = 1$ 表示 3 者完全同向,协同作用最强, $\Gamma = -1$ 表示完全反向,抵消效应最强; P_h 为近岸风、浪、流共同影响下的海滩相对污染概率; 系数 a 、 b 、 c 分别表征风、浪、流对海滩垃圾影响的贡献度,可根据研究区域特征进行调整,本文通过迭代计算确定最优的参数组合为 $a = 1$, $b = 0.1$, $c = 0.2$, 此时 P_h 与实测垃圾丰度的相关性最高。

3.3.3 人类活动影响

在跨海滩比较中,人类活动通常可采用区域经济产值、旅游人数或渔业收入等宏观指标加以量化。然而,本研究聚焦于小尺度海滩内部垃圾分布的空间异质性,因此采用采样带断面与海滩入口的水平直线距离作为人类活动强度的近似指标。

分析实测数据发现,在沿岸方向上,海滩垃圾丰度与入口距离之间存在明显的空间分布规律:邻近入口的区域因人为清洁活动频繁,海滩垃圾丰度较低;随着离入口距离的增加,人为清洁活动减少,垃圾丰度逐渐升高;而当距离进一步增大至远离主要活动范围时,人类活动强度减弱,垃圾丰度会有所降低。因此,整体上垃圾丰度随距入口距离增大呈现先增后减的趋势。值得注意的是,位于两个入口之间的区域受到双重距离效应的叠加影响,而单一入口外侧区域仅受该入口的单向影响,故在因子构建中对其作用强度进行减半处理。基于上述机制,建立人类活动影响下的海滩相对污染概率(P_i)计算式为

$$P_i = \begin{cases} r_1 + r_2 f(x) & x_1 \leq x \leq x_2 \\ r_1 + r_2 \frac{f(x)}{2} & x < x_1 \text{ 或 } x > x_2 \end{cases} \quad (18)$$

$$f(x) = \frac{\sin^2 \left(2\pi \frac{x-x_1}{d} \right)}{2} \quad (19)$$

式中: $f(x)$ 为基于采样带与两个入口相对位置的空间变化函数, x 为采样带位置, $x_1 = 0$ 为入口 1 的位置, $x_2 = d$ 为入口 2 的位置; d 为两入口间距; $r_1 = 0.3$ 为基线强度系数,代表各采样区域相对污染概率的基准值; $r_2 = 0.4$ 为振幅系数,表征人类活动影响下海滩相对污染概率的变化幅度。

基线强度系数 r_1 与振幅系数 r_2 的选取在有效反映实测垃圾丰度空间分布特征的同时,也兼顾了与其他影响因子的尺度协调,以避免在后续熵权法分析中因某一统计关系过于突出造成权重偏倚,从而更合理地反映近岸动力过程与人类活动对海滩垃圾分布的综合影响。

3.3.4 海滩滩涂垃圾相对污染概率

为定量评估潮波冲刷和近岸风、浪、流综合作用以及人类活动对海滩垃圾滞留概率的影响,本研究提出量化指标即海滩滩涂垃圾相对污染概率(P)。该指标采用无量纲的概率算术表达以消除各影响要素的量纲差异,用熵权法计算各影响因子的权重,信息熵值越小表明因子蕴含的信息量越大,相应赋予更高的权重^[52]。

$$P'_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n P_{ij}^2}} \quad (20)$$

式中: P_{ij} 为每个采样区域 i 计算得到的单影响因子 j 作用下海滩滩涂垃圾相对污染概率原始数据值; P'_{ij} 为归一化处理后的标准值; n 为采样区域总数。

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P'_{ij} \ln P'_{ij} \quad (21)$$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (22)$$

式中: E_j 为各影响因子的信息熵; W_j 为各影响因子的权重。

最终将计算得到的加权结果通过极差归一化处理,得到标准化的综合海滩滩涂垃圾相对污染概率 P_i :

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n W_j P'_{ij} - \left(\sum_{j=1}^n W_j P'_{ij} \right)_{\min}}{\left(\sum_{j=1}^n W_j P'_{ij} \right)_{\max} - \left(\sum_{j=1}^n W_j P'_{ij} \right)_{\min}} \quad (23)$$

式中 P_i 为采样区域 i 的综合海滩滩涂垃圾相对污染概率。

图 11 对比了不同影响因素作用下,各采样区域的海滩滩涂垃圾相对污染概率排名与实测垃圾丰度排名的变化情况.当同时考虑多种因素共同作用时,综合海滩滩涂垃圾相对污染概率与实测垃圾丰度整体上呈现出显著的同向变化趋势($r_s = 0.524, p =$

0.021),其相关性和显著性均高于单独考虑潮波冲刷作用($r_s = 0.420, p = 0.073$)和近岸风、浪、流影响作用($r_s = 0.167, p = 0.493$)以及人类活动作用($r_s = 0.212, p = 0.384$)的情形.这表明潮波冲刷和近岸风、浪、流以及人类活动共同驱动海滩垃圾丰度的空间分布.

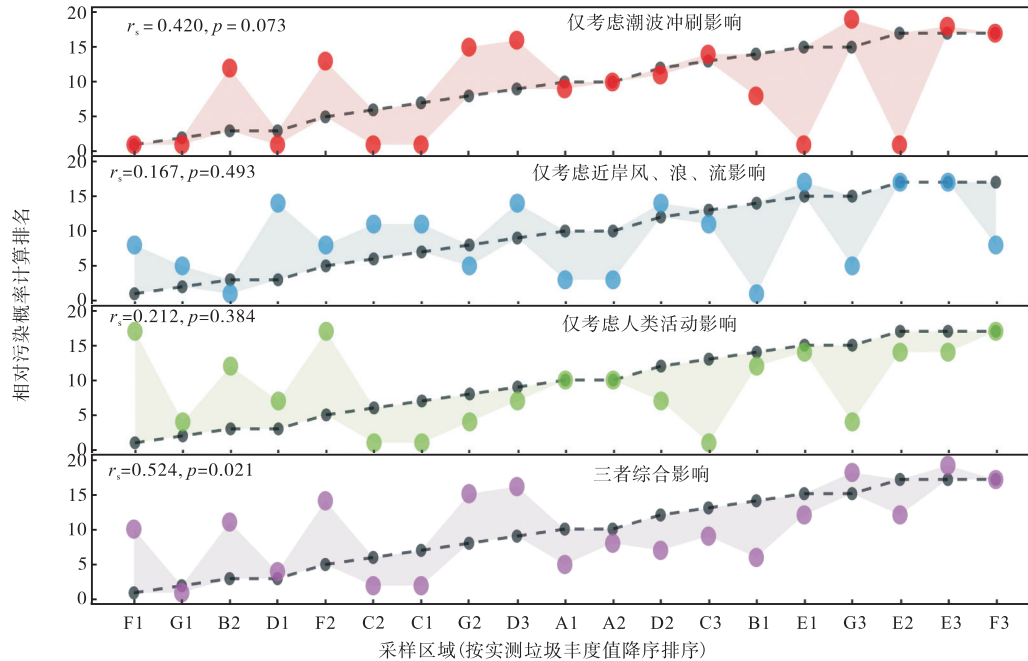


图 11 各采样区域海滩滩涂垃圾相对污染概率排名与实测垃圾丰度值排名变化对比(黑色点线为实测排名)

Fig.11 Comparative analysis of relative pollution probability rankings and observed litter abundance rankings for beach litter across sampling sites (black dotted line represents measured ranking)

需要指出的是,近岸风、浪、流影响作用的弱相关性可能源于水动力监测点位有限,难以充分反映各研究区域的动力差异.当以采样带 A~G 为单元计算近岸风、浪、流影响下的相对污染概率 P_h 与采样带平均垃圾丰度间的相关性时($r_s = 0.403, p = 0.370$),效果明显优于以单个采样区域为单元的情况.这一对比说明,为在小尺度范围内精确量化海滩垃圾的积累区域,需要进一步提高水动力监测的空间密度和覆盖率,以充分反映区域间的动力差异.

图 12 显示,各采样带的综合海滩滩涂垃圾相对污染概率与实测排名的平均绝对误差(MAE)存在差异,其中 A、E、G 采样带的排名平均绝对误差较小(A: MAE = 3.50, E: MAE = 3.33, G: MAE = 3.67),表明潮波冲刷和近岸风、浪、流作用及人类活动影响因子能够较好地解释这些区域的垃圾分布特征;而 B、F 采样带误差较大(B: MAE = 8.00, F: MAE = 6.00),意味着局部地形变化及其他未纳入指标的人类活动等潜在因素在这些区域可能发挥了更显著的作用.该误差差异进一步表明,在小尺度海滩范围内,不同区域处影响垃圾积累模式的主导因素存在显

著差异.因此,基于各影响因子的量化结果开展分区化管理,有助于提升海滩清洁工作的效率与针对性.

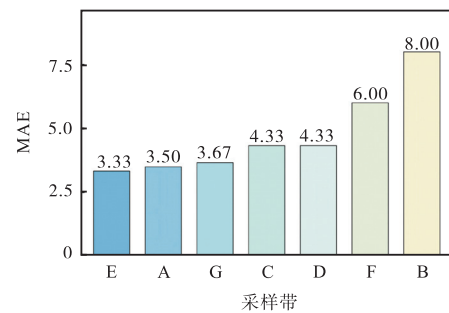


图 12 采样带综合相对污染概率与实测排名平均绝对误差
Fig.12 Mean absolute error between the comprehensive relative pollution probability and the measured ranking across sampling belts

3.4 海滩清洁程度评估

基于上节研究,采用修正后的淹没概率 $1-P'_f$ 表征海滩离岸动力强度,近岸风、浪、流综合影响 P_h 表征向岸动力强度,二者比值用于判断采样区域处的主导动力方向,比值越小说明向岸动力相对更强,反之,离岸动力更占优势.

已有研究表明, 海滩坡度影响也会使海滩垃圾积累特征呈现出明显的区域性差异. Haarr 等^[53]指出, 海滩坡度与垃圾丰度通常呈显著负相关关系, 即高坡度海滩的垃圾积累量往往低于低坡度海滩. 而 Hibatullah 等^[30]发现, 在海湾等相对封闭的区域, 高坡度海滩更易滞留垃圾, 低坡度海滩因受潮波作用强烈, 垃圾难以长期保留. 此外, Sibaja-Cordero 等^[54]的研究表明, 坡度与重质或易缠绕垃圾的滞留呈负相关, 但与部分塑料垃圾的滞留呈正相关. 总体来看, 低坡度海滩通常具有更高的总体垃圾丰度, 但其保留时间相对有限; 而高坡度海滩对轻质塑料垃圾等表现出选择性聚集作用, 更易形成局部的垃圾积累热点.

为系统分析棋子湾海滩垃圾的积累模式, 本节以主导动力方向和采样带断面坡度(详见表 1)的中位数($1 - P'_v/P_h = 0.138$, $\tan \beta = 0.0570$)作为阈值, 将坡度大于等于 0.0570 定义为高坡度, 反之为低坡度. 据此, 将采样区域划分为 4 类: 向岸-低坡度、向岸-高坡度、离岸-低坡度和离岸-高坡度. 各采样区域的分类情况及对应的清洁海岸指数 (CCI) 和塑料丰度指数 (PAI) 结果见表 3.

表 3 各采样区域海滩质量评估指数

Tab.3 Beach quality assessment indexes for each sampling area

分区	采样区域	CCI	海滩污染程度分类	PAI	海滩塑料污染程度分类
向岸-低坡度	C1	13.60	轻度污染	14.12	高度塑料污染
	C2	17.60	轻度污染	15.45	高度塑料污染
	D1	22.40	污染	12.86	高度塑料污染
	G1	23.20	污染	13.79	高度塑料污染
向岸-高坡度	A1	8.80	中度清洁	7.27	较高度塑料污染
	B1	4.00	清洁	16.00	高度塑料污染
	E1	3.20	清洁	10.00	高度塑料污染
	E2	0	非常清洁	0	非常轻度/无塑料污染
	F1	48.80	污染	16.07	高度塑料污染
离岸-低坡度	C3	5.60	中度清洁	20.00	高度塑料污染
	D2	7.20	中度清洁	11.11	高度塑料污染
	D3	9.60	中度清洁	15.00	高度塑料污染
	G2	11.20	轻度污染	14.29	高度塑料污染
	G3	3.20	清洁	0	非常轻度/无塑料污染
离岸-高坡度	A2	8.80	中度清洁	14.55	高度塑料污染
	B2	22.40	污染	12.14	高度塑料污染
	E3	0	非常清洁	0	非常轻度/无塑料污染
	F2	18.40	轻度污染	17.39	高度塑料污染
	F3	0	非常清洁	0	非常轻度/无塑料污染

整体来看, 棋子湾海滩的 CCI 平均值为 12.00, PAI 平均值为 11.05, 接近 80% 的采样区域受到较高等度的塑料污染. 棋子湾海滩的 CCI 均值与中国 58 个近岸区域的平均监测结果 (CCI = 0.93)^[55]相比较, 但低于 Ansari 等^[56]统计的全球 40 个代表性海滩

的垃圾丰度中位数 (CCI = 18). 值得注意的是, 棋子湾开敞反射型海滩 ($\Omega < 1$) 的强侵蚀作用会导致垃圾碎片化现象加剧, 使得基于数量指标评估的污染程度系统性偏高^[11, 57-59].

比较不同分区的 CCI 与 PAI 平均值、中位数及标准差(表 4)可以发现, 不同动力-坡度组合下的垃圾积累模式存在明显差异. 向岸动力普遍促进垃圾在滩面的滞留, 而离岸动力则倾向于将垃圾带离滩面, 无论坡度如何变化, 这种作用始终存在.

表 4 基于动力-坡度分区的海滩质量评估指数

Tab.4 Beach quality assessment indexes based on dynamic-slope zonation

分区	平均值		中位数		标准差	
	CCI	PAI	CCI	PAI	CCI	PAI
向岸-低坡度	19.20	14.80	20.00	15.00	4.48	1.54
向岸-高坡度	13.00	9.87	4.00	10.00	20.30	6.71
离岸-低坡度	7.36	12.10	7.20	14.30	3.17	7.47
离岸-高坡度	9.92	8.82	8.80	12.10	10.30	8.26

结合棋子湾海滩的研究结果可以发现, 在向岸动力主导的低坡度区域中, CCI 与 PAI 的平均值和中位数均处于较高水平, 且标准差较小, 说明该类区域处垃圾(尤其是塑料垃圾)积累较为稳定, 是海滩垃圾聚集的热点. 相比之下, 离岸动力主导的低坡度区域整体最为清洁, 说明低坡度断面在离岸动力作用下对垃圾的保留能力较弱, 而在向岸动力作用下接收垃圾的能力较高. 此外, 在高坡度区域中, CCI 与 PAI 的标准差均较大, 进一步印证了高坡度区域垃圾分布存在较强的不均匀性, 易形成局部的垃圾堆积区.

3.5 本研究局限性

由第 1.2 节可知, 本研究主要聚焦于短期水动力对海滩垃圾积累分布的影响, 因此, 本文的调查数据仅代表秋季棋子湾海滩垃圾的短期丰度分布. 海滩垃圾丰度通常还具有一定的季节性变化, 受水文、旅游活动等因素影响, 不同区域会表现出差异化的季节变化模式^[60-63]. 受台风和降雨输入影响, 棋子湾在雨季(5 月—11 月), 特别是 8、9 月台风盛行期^[64], 垃圾丰度可能有所增加. 根据走访调研, 棋子湾并非典型的热门景区, 旅游淡旺季区别并不明显. 本次调研恰处于台风季期间, 调查的垃圾丰度可能反映了棋子湾海滩的年内较高值, 未来需通过长期监测来探究其季节性变化规律.

4 结 论

本研究通过秋季对海南昌江棋子湾典型侵蚀型

海滩的高密度精细化调查与量化分析,探讨了海滩垃圾在开敞反射型砂质海滩上的空间积累模式及主要影响因素,得出以下结论。

(1) 棋子湾海滩秋季垃圾平均丰度为0.60件/m²,以塑料类垃圾(71.9%)为主,海滩垃圾尺寸主要分布于2.5 cm~1 m范围内,颜色以白色/透明(34.74%)为主。从垃圾种类角度来看,海滩垃圾的主要来源为人类海岸活动(56%)和航运/捕鱼活动(39%),呈现出典型的陆海交互输入特征。

(2) 棋子湾海滩垃圾分布具有明显的空间异质性,离岸方向上,沙丘区和后滨区的垃圾丰度较高,从陆向海垃圾丰度与平均尺寸逐渐减小。沿岸方向上垃圾丰度呈现东高西低的分布格局。

(3) 地形地貌、动力条件与人类活动共同影响垃圾滞留。受紫外线照射、波浪冲刷和侵蚀性海滩坡度较陡地形的影响,前滨处垃圾丰度较小且呈碎片化。在风暴露程度较大、水动力作用较强的开敞海滩处,沙丘区和后滨区海滩垃圾的富集主要与近岸动力分选机制相关,而海滩垃圾分布的空间不均匀性与风向、流向密切相关。

(4) 系统分析了潮波冲刷作用和近岸风、浪、流综合作用以及人类活动对开敞侵蚀型反射海滩垃圾空间积累分布的影响,并结合熵权法,提出了海滩滩涂垃圾相对污染概率(P)。结果表明,三者的耦合作用对海滩垃圾丰度的空间分布具有更强的解释能力($r_s = 0.524, p = 0.021$)。海滩滩涂垃圾相对污染概率指标的引入从机制层面解析了海滩垃圾的空间积累模式,为开敞侵蚀型海滩的空间精细化治理提供了定量依据。

本研究以采样带断面距海滩入口的水平直线距离作为人类活动强度的近似量化指标,构建的相对污染概率指标在解释海滩垃圾丰度时存在一定局限性。未来仍需要结合长期、宽覆盖的监测数据,完善人类活动(如游客流量、渔业活动和海滩清理频率等数据)及水文、地貌要素长期变化对海滩垃圾积累模式的影响。同时,应进一步拓展海滩滩涂垃圾相对污染概率指标的应用范围,逐步建立起更具普适性的海滩滩涂垃圾相对污染概率指标体系。

参考文献:

- [1] Nguyen D, Nguyen M K, Pham M T, et al. Investigating macro marine litter and beach cleanliness along southern vietnam beaches[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 212: 117566.
- [2] Ponmani M, Padmavathy P, Manimekalai D, et al. Spatial variation and pollution indices of anthropogenic marine litter on the beaches in gulf of Mannar, India[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 216: 118014.
- [3] Iñiguez M E, Conesa J A, Fullana A. Marine debris occurrence and treatment: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 394-402.
- [4] Giugliano R, Casani C, Locritani M, et al. Italian pellets watch: First step towards national assessment of resin pellets distribution, characterization and pollutants absorption[J]. *Environmental Research*, 2025, 278: 121644.
- [5] Zhang Y F, Liang J, Zeng G M, et al. How climate change and eutrophication interact with microplastic pollution and sediment resuspension in shallow lakes: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135979.
- [6] Camacho M, Herrera A, Gómez M, et al. Organic pollutants in marine plastic debris from Canary Islands beaches[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 22-31.
- [7] Wright L D, Short A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis[J]. *Marine Geology*, 1984, 56(1/2/3/4): 92-118.
- [8] 冯曦, 毛雅诗, 周赢涛. 岬湾海滩灾后恢复过程与主控影响因子研究——以澳洲 Narrabeen 海滩为例[J]. *海洋学报*, 2023, 45(12): 80-91.
Feng Xi, Mao Yashi, Zhou Yingtao. Study on the recovery process and the main controlling factors for post-storm beach profiles of a headland bay: Taking the Narrabeen Beach in Australia as an example[J]. *Haiyang Xuebao*, 2023, 45(12): 80-91 (in Chinese).
- [9] Masselink G, Gehrels R. *Coastal Environments and Global Change*[M]. Oxford: John Wiley and Sons, Inc., 2014.
- [10] Li H C, Feng X, Ni X Y, et al. Beaching process of floating marine debris associated with the evolution of the nearshore wave[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 197: 115695.
- [11] Ryan P G, Perold V, Osborne A, et al. Consistent patterns of debris on South African beaches indicate that industrial pellets and other mesoplastic items mostly derive from local sources[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 1008-1016.
- [12] Kaviarasan T, Dhineka K, Sambandam M, et al. Impact of multiple beach activities on litter and microplastic composition, distribution, and characterization along the

- southeast coast of India[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2022, 223: 106177.
- [13] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(9): 3404-3409.
- [14] Isobe A, Kubo K, Tamura Y, et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 89(1/2): 324-330.
- [15] Hinata H, Mori K, Ohno K, et al. An estimation of the average residence times and onshore-offshore diffusivities of beached microplastics based on the population decay of tagged meso- and macrolitter[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 122(1/2): 17-26.
- [16] Dekiff J H, Remy D, Klasmeier J, et al. Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 186: 248-256.
- [17] Lumilan D R T, Shiu R F, Bacosa H P. Differentiating macroplastic and mesoplastic pollution on relatively clean beaches of central Philippines[J]. *Marine Environmental Research*, 2025, 207: 107092.
- [18] Nel H A, Froneman P W. A quantitative analysis of microplastic pollution along the south-eastern coastline of South Africa[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101: 274-279.
- [19] Ronda A C, Menéndez M C, Tombesi N, et al. Microplastic levels on sandy beaches: Are the effects of tourism and coastal recreation really important?[J]. *Chemosphere*, 2023, 316: 137842.
- [20] 张长炜, 徐艳东, 朱金龙, 等. 山东威海典型岸滩海滩垃圾分布特征与来源分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2024, 46(1): 159-166.
- Zhang Changwei, Xu Yandong, Zhu Jinlong, et al. Distribution characteristics and source analysis of beach litter of Weihai, Shandong province[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2024, 46(1): 159-166 (in Chinese).
- [21] 黄备, 罗韩燕, 王婕妤, 等. 杭州湾海洋垃圾污染的调查与分析[J]. *海洋环境科学*, 2024, 43(5): 707-714.
- Huang Bei, Luo Hanyan, Wang Jieyu, et al. Investigation and analysis of marine litter pollution in Hangzhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2024, 43(5): 707-714 (in Chinese).
- [22] 邓炜华, 唐俊逸, 罗育池, 等. 广东省海洋垃圾污染特征、来源及风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2024, 43(5): 696-706.
- Deng Weihua, Tang Junyi, Luo Yuchi, et al. Pollution characteristics, sources and risk assessment of marine litter in Guangdong province[J]. *Marine Environmental Science*, 2024, 43(5): 696-706 (in Chinese).
- [23] Zhang T, Lin L, Li M M, et al. Investigation on beach debris on the historical nesting grounds of green turtles (*Chelonia mydas*) in Hainan Island, South China[J]. *Heliyon*, 2023, 9(2): e13400.
- [24] 李丽, 武兴, 郭雅. 海南岛西北部海岸线时空变化分析[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(2): 87-93.
- Li Li, Wu Xing, Guo Ya. Temporal and spatial variation analysis of the coastline of northwestern Hainan Island[J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(2): 87-93 (in Chinese).
- [25] 黄伟, 曾江宁, 陈全震, 等. 海洋生态红线区划——以海南省为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(1): 268-276.
- Huang Wei, Zeng Jiangning, Chen Quanzhen, et al. Preliminary research on the zoning method of the marine ecological red line: A case study of Hainan province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1): 268-276 (in Chinese).
- [26] 昌江县统计局. 2023 年昌江黎族自治县国民经济和社会发展统计公报[R]. 昌江: 昌江县统计局, 2024.
- Changjiang County Bureau of Statistics. 2023 Statistical Bulletin of National Economic and Social Development of Changjiang Lizu Autonomous County[R]. Changjiang: Changjiang County Bureau of Statistics, 2024 (in Chinese).
- [27] 司月君, 李保生, 李志文, 等. 北部湾海岸现代风沙与海滩沙粒度特征对比[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(6): 43-52.
- Si Yuejun, Li Baosheng, Li Zhiwen, et al. A comparative analysis of grain size characteristics of modern aeolian sand and beach sand from the coast of Beibu Gulf in China[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(6): 43-52 (in Chinese).
- [28] Ilechukwu I, Das R R, Jamodiong E A, et al. Abundance and distribution of marine litter on the beaches of Okinawa Island, Japan[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 200: 116036.
- [29] Salinas C X, Palacios E, Pozo K, et al. Marine litter pollution in a subantarctic beach of the Strait of Magellan, Punta Arenas, Chile[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 202: 116313.

- [30] Hibatullah M F, Mutaqin B W. Marine debris characteristics in various coastal typologies in the Gunungkidul coastal area of Yogyakarta—Indonesia[J]. *Discover Geoscience*, 2024, 2(1): 28.
- [31] 王词稼, 褚晓婷, 曲玲, 等. 大连傅家庄海滩垃圾与微塑料污染分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2025, 44(4): 563-572.
Wang Cijia, Chu Xiaoting, Qu Ling, et al. Distribution characteristics of litter and microplastic pollution in Fujiazhuang Beach, Dalian[J]. *Marine Environmental Science*, 2025, 44(4): 563-572 (in Chinese).
- [32] Ferguson R I, Church M. A simple universal equation for grain settling velocity[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(6): 933-937.
- [33] le Méhauté B, Koh R C Y. On the breaking of waves arriving at an angle to the shore[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1967, 5(1): 67-80.
- [34] Alkalay R, Pasternak G, Zask A. Clean-coast index—A new approach for beach cleanliness assessment[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2007, 50(5/6): 352-362.
- [35] Rangel-Buitrago N, Mendoza A V, Mantilla-Barbosa E, et al. Plastic pollution on the Colombian central Caribbean beaches[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 111837.
- [36] 国家海洋局生态环境保护司. 海环字[2015] 31号 海洋垃圾监测与评价技术规程(试行)[S/OL]. http://gc.mnr.gov.cn/201807/t20180710_2079008.html, 2015-10-22.
State Oceanic Administration, Department of Ecological Environment Protection. Hai Huan Zi[2015] No.31 Technical Regulations for Monitoring and Evaluation of Marine Litter(for Trial Implementation)[S/OL]. http://gc.mnr.gov.cn/201807/t20180710_2079008.html, 2015-10-22(in Chinese).
- [37] Northwest Pacific Action Plan. Marine Litter in the Northwest Pacific Action Plan Region[R]. Toyama: NOWPAP, 2011.
- [38] Zhang T, Jiang Y K, Li D Q, et al. Accumulation rate and sources of plastic marine litter at nesting grounds of green turtles on the North Island of Qilianyu, Xisha Islands, South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 203: 116485.
- [39] Martí E, Martín C, Galli M, et al. The colors of the ocean plastics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(11): 6594-6601.
- [40] Li X, Huang D F, Dong H R, et al. Differential photoaging behaviors of different colored commercial polyethylene microplastics in water: The important role of color characteristics[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 956: 177361.
- [41] Hinojosa I A, Thiel M. Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(3): 341-350.
- [42] Kuroda M, Isobe A, Uchida K, et al. Abundance and potential sources of floating polystyrene foam macro- and microplastics around Japan[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 925: 171421.
- [43] Rodrigues C, Rodríguez Y, Frias J, et al. Microplastics in beach sediments of the Azores archipelago, NE Atlantic[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 201: 116243.
- [44] Nguyen M Y, Vanreusel A, Ngo X Q, et al. Microplastic pollution in Vietnamese sandy beaches: Exploring the role of beach morphodynamics and local management[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 214: 117838.
- [45] Fenn O J, Walklett E J, Turner A. Relationships between sediment size distribution and microplastic abundance and characteristics along the strandline of a sandy embayment (Whitsand, Southwest England)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 213: 117686.
- [46] Chubarenk O I, Esiukova E, Khatmullina L, et al. From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111198.
- [47] Hines E, Jaubet M L, Cuello G V, et al. Macro-, meso- and microplastic abundance in sandy beaches and factors influencing their distribution in an SW Atlantic resort[J]. *Marine Environmental Research*, 2023, 190: 106104.
- [48] Dimassi S N, Hahladakis J N, Yahia M N D, et al. Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022, 15(11): 104262.
- [49] Jayasiri H B, Purushothaman C S, Vennila A. Plastic litter accumulation on high-water strandline of urban beaches in Mumbai, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(9): 7709-7719.
- [50] Lefebvre C, Rojas I J, Lasserre J, et al. Stranded in the high tide line: Spatial and temporal variability of beached microplastics in a semi-enclosed embayment (Arcachon, France)[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149144.
- [51] Stockdon H F, Holman R A, Howd P A, et al. Empirical parameterization of setup, swash, and runup[J]. *Coastal*

- Engineering, 2006, 53 (7) : 573-588.
- [52] Xiang Q, Fan D D, Zhu L M, et al. Weighted comprehensive risk assessment and pollution analysis of long-term printing and dyeing sludge landfills in an industrialized Chinese city[J]. Environmental Pollution, 2025, 367 : 125665.
- [53] Haarr M L, Westerveld L, Fabres J, et al. A novel GIS-based tool for predicting coastal litter accumulation and optimising coastal cleanup actions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 139: 117-126.
- [54] Sibaja-Cordero J A, Gómez-Ramírez E H. Marine litter on sandy beaches with different human uses and waste management along the Gulf of Nicoya, Costa Rica[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 175: 113392.
- [55] 生态环境部. 2023 年中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京:生态环境部, 2024.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China Marine Ecological Environment Status Bulletin 2023[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 2024 (in Chinese).
- [56] Ansari M, Farzadkia M. Beach debris quantity and composition around the world: A bibliometric and systematic review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 178 : 113637.
- [57] Fok L, Cheung P K. Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 99 (1/2) : 112-118.
- [58] Markić A, Iveša N, Budiša A, et al. Fragmented marine plastics as the prevalent litter type on a small island beach in the Adriatic[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 203 : 116467.
- [59] Cheung P K, Cheung L T O, Fok L. Seasonal variation in the abundance of marine plastic debris in the estuary of a subtropical macro-scale drainage basin in South China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562: 658-665.
- [60] Pervez R, Jia C, Sardar M, et al. Spatiotemporal trends and index-based assessment of beach litter abundance and pollution status on Shantou beaches, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2025, 221 : 118584.
- [61] Özşeker K, Coşkun T, Erüz C. Exploring seasonal, spatial and pathways of marine litter pollution along the Southeastern Black Sea Coast of Türkiye[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 202: 116348.
- [62] Pervez R, Lai Z. Spatio-temporal variations of litter on Qingdao tourist beaches in China[J]. Environmental Pollution, 2022, 303 : 119060.
- [63] Barría-Herrera J, Vergara-Cortés H, Contreras-López M, et al. A seasonal comparison of litter impacts along the Viña del Mar-Concón coastal strip, Valparaiso region of Chile[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 172: 112854.
- [64] 黄昕僖, 周玉东, 张馨仁, 等. 海南西部昌江县极端降雨变化及台风降雨未来预估[J]. 灾害学, 2025, 40 (3) : 189-196.
Huang Xinxi, Zhou Yudong, Zhang Xinren, et al. Extreme precipitation changes and typhoon precipitation estimate in Changjiang County of Western Hainan[J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40 (3) : 189-196 (in Chinese).

(责任编辑: 田 军)